

## ニュートリノ検出装置内における $^{198}\text{Au}$ のベータ崩壊の揺らぎの観測

石橋 健二<sup>\*1</sup>、有馬 秀彦<sup>\*1</sup>、劉 衛<sup>\*2</sup>、伊藤 眞<sup>\*3</sup>、堀口 哲男<sup>\*3</sup>、古賀 妙子<sup>\*3</sup>、森嶋 彌重<sup>\*3</sup>

### Observation of Fluctuation in Beta-decay of $^{198}\text{Au}$ Placed in a Small Apparatus for Neutrino Detection

Kenji Ishibashi<sup>\*1</sup>, Hidehiko Arima<sup>\*1</sup>, Wei Liu<sup>\*2</sup>, Shin Ito<sup>\*3</sup>, Tetsuo Horiguchi<sup>\*3</sup>, Taeko Koga<sup>\*3</sup>, Hiroshige Morishima<sup>\*3</sup>

#### ABSTRACT

If self-shielding property of weak interaction can be made imperfect under a specific situation, the influence may appear on neutrino interaction with other substances as well as beta decay of radioisotopes. A simple and compact apparatus has been developed for detection of neutrinos on the basis of a new hypothesis. The apparatus consists of two electrodes, raw silk and purified water. The apparatus utilizing the raw silk generated an appreciably high output voltage when it was irradiated with intense flux of reactor neutrinos nearby reactor core. The results suggest that a new aspect of weak interaction between the neutrinos and the purified water may exist under the environment in the apparatus: The raw silk is one of candidates of materials which induce a non-standard V-A interaction. To observe the influence on beta decay of radioisotopes placed in the apparatus environments, we selected the beta decay of  $^{198}\text{Au}$ . The radioisotope of  $^{198}\text{Au}$  was produced by Au foils via  $^{197}\text{Au}(n_{\text{th}}, \gamma)^{198}\text{Au}$  reaction. The gamma-ray spectra from the samples placed in the apparatus were measured with a high-purity Ge detector for a few days by repetitive data taking with short time-intervals. The fluctuation of decay rates for each sample was evaluated by the Fast Fourier Transformation (FFT) for the full energy peak counts in the spectrum. The decay rates of  $^{198}\text{Au}$  in the apparatus tended to show a periodical fluctuation different from that of control samples.

*Keywords* : weak interaction, beta decay, neutrino,  $^{198}\text{Au}$ , fluctuation

---

<sup>\*1</sup> 九州大学大学院工学研究院

<sup>\*2</sup> 九州大学大学院工学府

<sup>\*3</sup> 近畿大学原子力研究所

Faculty of Engineering, Kyushu University

Graduate School of Engineering, Kyushu University

Atomic Energy Research Institute, Kinki University

## 1. はじめに

日本における原子力発電は総発電量の1/3を越えており、今や社会にとって不可欠な存在である。さらに、原子力発電は運転中に二酸化炭素を発生しないので地球温暖化抑制の点からも今後とも有望なシステムである。しかしながら、原子力発電で発生する高レベル放射性廃棄物の処理が問題となりつつある。高レベル放射性廃棄物の約98%を占める核分裂生成物は基本的に中性子過剰核種であり $\beta$ 崩壊をする[1]。核分裂生成物の大部分は短半減期であるが、半減期が数十年以上の長寿命核種も存在する。現在、長寿命核種に対しては地層処分、もしくは原子炉や加速器を用いた変換処理が検討されているが、有効な処理処分方法の確定には至っていない。もしも $\beta$ 崩壊核種の崩壊を直接抑制または促進させる方法が見出せれば、社会的にも学術的にも有意義な発見となる。しかしながら、これまでになされた $\beta$ 崩壊核種の崩壊率を変えようとする理論的及び実験的試みにおいて有意に大きな変化が生じたという報告はなく、崩壊を抑制または促進する有効な方法は見つかっていない。

現在、我々のグループは $\beta$ 崩壊に変化を及ぼす可能性のある方法の一つとして今まで報告されたことのない手法を検討している。本研究は、 $\beta$ 崩壊が非常に小さな弱い相互作用[2]に支配されて起こることに着目し、弱い相互作用の大きさまたは型が変化した環境中では核種の $\beta$ 崩壊にも変化が生じるのではないかという考えに基づくものである。

本論文では、 $\beta$ 崩壊核種として $^{198}\text{Au}$ を選び、 $\beta$ 崩壊に対する外的環境の影響を調べた実験結果について報告する。

## 2. 弱い相互作用

弱い相互作用は、Lorentz変換に不変な5つの相互作用型のうちの2つの型の結合形であるV-A型(ベクトル-軸性ベクトル型)として知られている[3]。電磁相互作用や強い相互作用が基本的にV型(ベク

トル型)相互作用であることと大きく違うので、弱い相互作用の性質は多くの研究者の興味を引いてきた。

ビッグバン直後の宇宙にはレプトンだけが存在していたが、その後、陽子や中性子が生成され、それをもとに元素合成が進んできたとされている。中性子は半減期約10分で $\beta$ 崩壊を行い、陽子、電子及び反電子ニュートリノに分解する。逆に考えると、ベータ崩壊をつかさどる弱い相互作用によって中性子ができており、中性子が存在することにより原子核の存在が可能になっている。つまり、弱い相互作用は小さな相互作用であっても重要であり、原子核は弱い相互作用なしには存在できないと考えることができる。

宇宙の始まりから現在にいたるまで、または自然界の全ての場所において弱い相互作用の強さが全く同じであるという保証は必ずしもない。本研究は、弱い相互作用の強さが変化するという仮説に基づいている。現在、弱い相互作用はV-A型であるとされており、それによって実験事実を説明することができる。このV-A型の相互作用は、その背景として、電磁相互作用と同じ大きさの本来の場が自然界の持つ作用機構(Higgs機構)により遮蔽されてできていると理解されている。もしも自然界のある種の物質または空間において通常のHiggs機構の働きに影響を与える場が存在するならば、弱い相互作用の大きさが変化する可能性がある。我々のグループでは、従来とは異なる方法によるニュートリノの高効率検出、さらには弱い相互作用の将来的な利用の可能性を求めて、Higgs機構を変化させる場を有する物質・条件を探索してきた。我々の予備的研究において、ある条件下では前述したような弱い相互作用の強さを変化させる環境が存在し、その環境を利用した装置はニュートリノの検出に有効とみなせる応答を示す結果[4]が得られており、現在理論と実験の両面から研究を進めている。

### 3. 実験

#### 3-1. 実験装置

本研究では $\beta$ 崩壊核種の崩壊に外的環境の違いで変化が見られるのかどうかを観測するため、前述した仮説に基づいて開発中のニュートリノ検出装置[5]を使用した。Fig.1に装置の構造を示す。装置は外径80mm高さ100mmのテフロン製円筒容器であり、内部に45mlの精製水が入っている。水の蒸発及び内部への空気等の侵入を防ぐため、装置はOリング付上蓋により封入されている。Fig.1に示すように金及び炭素(グラッシカーボン)製の2枚の電極があり、どちらも幅20mm長さ50mmの短冊状をしている。両電極とも化学的に活性度の低い材質としている。信号検出は両電極間に発生する起電力を計測することによって行なう。実際の測定では発生した電流を電圧に変換して記録する。本装置では弱い相互作用であるV-A型の作用状態を変える性質を有する物質として、生糸(0.5gづつ)を金電極の両側に装着している。

我々の仮説では、ニュートリノは単体ではなく、構成粒子がV-A型相互作用で結合した複合体から構成されていると捉えている。生糸はA型の場を持

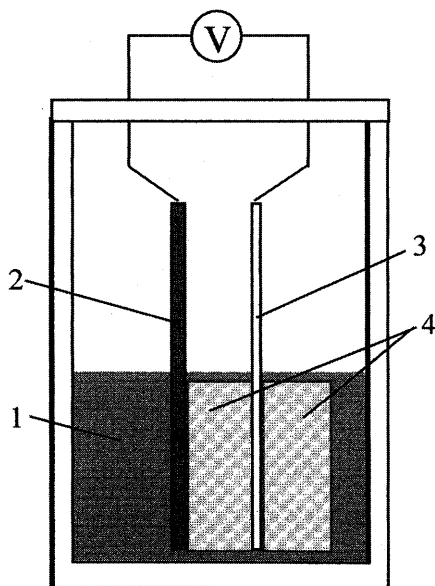


Fig.1 使用したニュートリノ検出装置の構造。なお、図中の番号1は精製水、2は炭素電極、3は金電極、4は生糸である。

ち、その場合はニュートリノを不安定にし、装置内の水分子との相互作用を容易にすると考えている。従って装置内ではニュートリノにより水分子が水酸イオンと水素イオンに解離される確率が増大し、電極間に有意な起電力が発生する可能性がある。この装置がニュートリノに有感であるのかを調べるため、強い反電子ニュートリノ源[6]である原子炉炉心近くに3日間設置し、通常の場合(九州大学の実験室)に置いた装置との起電力の比較を行なった[7]。Fig.2に示すように、炉心近くにおいて原子炉ニュートリノを照射した装置のみ初期3日間に起電力の急激な増大が見られた。つまり、この装置内部では、ニュートリノに通常よりも強く反応し大きな起電力が発生する特殊な弱い相互作用の環境が形成されており、相互作用が大きくなっている可能性がある。

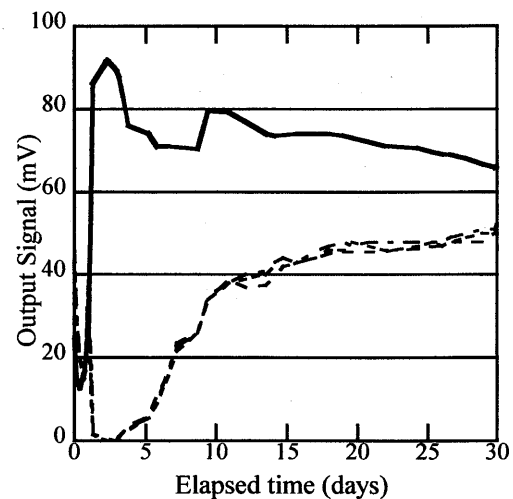


Fig.2 開発したニュートリノ検出装置のニュートリノに対する応答。図中の実線は原子炉炉心近くに3日間設置したものであり、点線は九州大学において測定したものである。

#### 3-2. 試料作成及び測定方法

本研究では $\beta$ 崩壊核種として、取扱いが容易で化学的にも安定している金の放射化により得られる $^{198}\text{Au}$ (半減期2.69日、 $\beta$ 崩壊)を選択した。ちなみに、 $^{198}\text{Au}$ の崩壊率を変化させる試みは文献[8]のみに報告がある。

近畿大学原子炉(UTR-KINKI)において、金箔(面

積10mm×10mm, 厚さ0.03mm)を放射化し $^{198}\text{Au}$ を生成した。照射条件は中性子束 $10^7\text{1/cm}^2/\text{s}$ の位置で2時間とした。放射化後、原子炉照射孔から放射化金箔をすぐに取り出し測定試料を作成した。本研究では以下の3種類の試料を作成した：

- (1)放射化金箔のみ
- (2)金箔を数mmの長さに細断しておいた乾燥生糸とプラスチック容器に詰込んだもの
- (3)ニュートリノに有感な応答を示すニュートリノ検出装置(Fig.1)の内部(水中)に金箔を挿入したもの

測定には各々鉛シールド内に置かれた2台の高純度Ge半導体検出器を使用し、各々の測定試料について $^{198}\text{Au}$ からの $\gamma$ 線を測定した。パイルアップの影響を押さえるため、高純度Ge半導体検出器のプリアンプからの信号をスペクトロスコピーアンプ(SSA)で整形時定数 $1\mu\text{s}$ によって増幅し、マルチチャンネルアナライザ(MCA)で約3日間連続測定した。得られたスペクトルから、光電ピーク( $^{198}\text{Au}$ では $0.412\text{MeV}$ )の面積(カウント)を算出した。なお、各測定においては、測定開始時の計数率をほぼ一致させるように検出器と試料間の位置を調整した後に連続測定した。Fig.3に測定スペクトルの例を示す。図中900ch付近にみられる鋭いピークが $^{198}\text{Au}$ の光電ピーク( $0.412\text{MeV}$ )である。

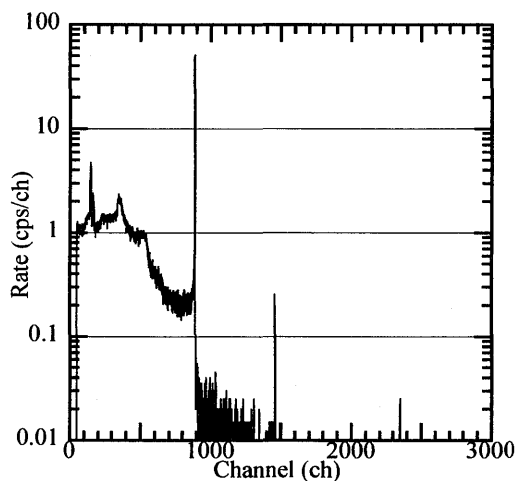


Fig.3  $^{198}\text{Au}$ からの $\gamma$ 線スペクトルの例。900ch付近の大きなピークが $^{198}\text{Au}$ の光電ピーク( $0.412\text{MeV}$ )に相当する。

#### 4. 結果及び考察

測定結果の例をFig.4に示す。本研究では各試料の測定で得られた崩壊曲線より求めた半減期に差異は見られなかった。しかし、崩壊率に揺らぎが生じている傾向があったため、試料による崩壊率の変動に注目し、変動周期の抽出を試みた。通常、崩壊曲線は何らかの揺らぎを生じており、本来この揺らぎは崩壊がPoisson分布に従うことにより発生するものである。この揺らぎは核種の外的環境には依存しないと考えられているが、本研究では崩壊の揺らぎの周期成分を次に示すような3つの方法を用いて求めた。

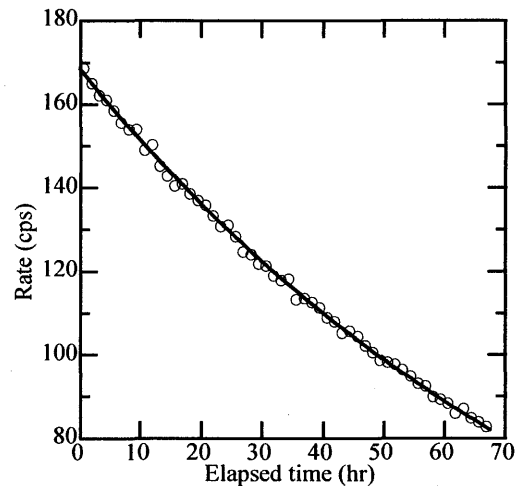


Fig.4 ニュートリノ検出装置内に置かれた $^{198}\text{Au}$ の崩壊曲線の例。実線は指数関数による崩壊率曲線を表す。

- (a) 求めたピーク計数率 $N_i$ を指数関数崩壊率曲線から求めた計数率 $A_i$ で規格化( $N_i/A_i$ )し、高速フーリエ変換(FFT)を用いて、その時間的揺らぎの周期成分を抽出する[9]。
- (b) 理論上、隣り合う一定の時間幅での計数の比は一定になる。そこで各計数比の一定値からのずれをFFTを用いて周期成分を抽出する。
- (c) 各計数値の平均値及び二乗平均値からFeynman- $\alpha$ 法により求めた $Y$ 値をFFTすることにより周期成分を抽出する。(a)(b)のような計数率の大きさの直接的な揺らぎではなく、各時間幅の計数のPoisson分布からのズレだけに注目した方法である。

上述した方法により得た崩壊の揺らぎの周期特性を比較した。その結果をFig.5に示す。(a)~(c)いずれの解析方法においても、(1)放射化金箔そのまま測定した結果(細点線)と、(2)細断した乾燥生糸と混合した状態にして測定した試料による結果(太点線)とは殆ど差異はみられなかった。しかしながら、(3)放射化金箔をニュートリノ有感と考えている装置(ニュートリノ検出装置)内に挿入して測定した場合(実線)は他の傾向と異なり、周期2~3時間

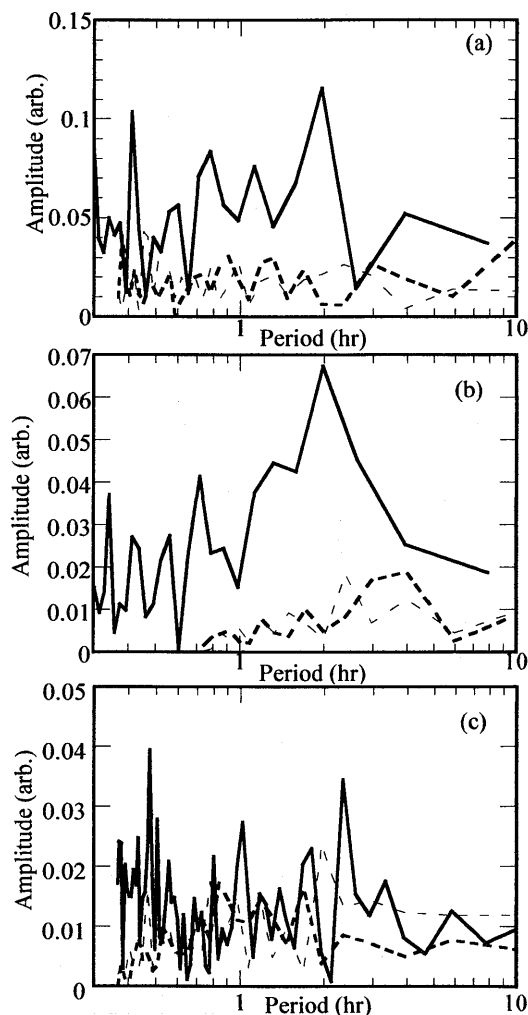


Fig.5  $^{198}\text{Au}$ の崩壊の計数率の揺らぎの周期特性のFFT解析結果。(a)は近似曲線との残差をFFTした結果、(b)は一定時間ごとの計数値の比をFFTした結果、(c)はFeynman- $\alpha$ 法で得られるY値(Poisson分布からのズレ)をFFTした結果である。実線は小型装置内に入れて測定、太点線は乾燥生糸と一緒に測定、細点線は放射化金箔のみで測定した結果である。

の付近において大きな成分を有することが判明した[10]。特に、方法(b)での違いが大きい。次に放射化金箔のみの場合と金箔を装置内に挿入して測定した場合に対して再測定を行なった。さらに、より短い周期成分の揺らぎを調べるため、連続測定の時間間隔を660sec(600sec測定+60sec待機)であったのを、220sec(200sec測定+20sec待機)へと変更した。測定はFig.1に示した小型装置内に放射化金箔を入れた場合と金箔のみでの測定を2回づつ行なった。Fig.6に方法(a)による解析結果を示す。Fig.5の結果と同様、放射化金箔をニュートリノ検出装置内に挿入して測定した場合、放射化試料のみで測定した場合とは異なり、周期2時間付近の成分が現れることが確認された。

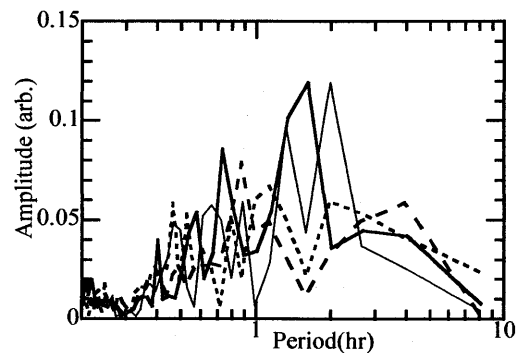


Fig.6  $^{198}\text{Au}$ の崩壊の計数率の揺らぎの周期特性を方法(a)を用いて求めた結果。図中、実線のデータは小型容器内に金箔を入れた結果、点線は金箔のみで測定した結果である。各々、2回の測定を行った。周期1時間から2時間付近において検出装置内に試料を入れて測定した場合の方が強くなっている。

金の放射化の程度、ならびにGe検出器等の測定環境を変えた場合でも前述した現象が再現されるのかどうかを確認するため、九州大学においても同様の測定を行なった。この場合、金箔の放射化には水槽中に置かれた0.5Ci-AmBe線源を使用した。中性子源の強度が弱いので金箔を20枚使用して2週間の照射期間の後に測定した。初期計数率は近畿大学での測定時の約1/8であった。測定では連続測定の時間間隔を15sec(10sec測定+5sec待機)とさらに短く変更した。Fig.7に示すように崩壊の揺らぎ(Y値)の周期成分の解析結果を示す。近畿大学において測

定された結果と同様、放射化金箔を小型装置内に入れた場合の方が周期2〜4時間付近の強度が大きくなる傾向にあることがわかる。九州大学での測定結果は、金箔の枚数が多いことや計数率が低いこと等が影響している可能性がある。なお、図中の数値 ( $2.41 \pm 1.27$ ) は、崩壊がPoisson分布に従うものと仮定して計算した値である。

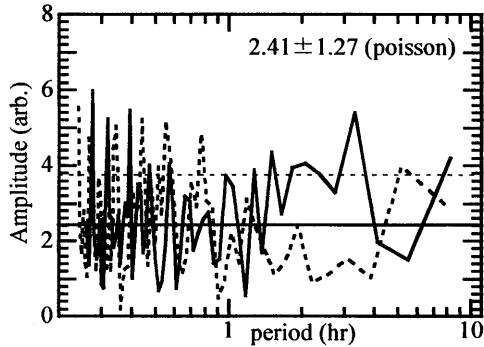


Fig.7 九州大学において測定した $^{198}\text{Au}$ の崩壊の計数率の揺らぎ(Y値;Poisson分布からのズレ)の周期特性の解析結果。実線は小型容器内に金箔を入れた結果、点線は金箔のみで測定した結果である。なお、図中の数値はPoisson分布を仮定した計算により求めた平均値である。

## 5. まとめ

$\beta$ 崩壊核種の崩壊率について、特殊な環境下で弱い相互作用の強さが変化する可能性を調べるために、開発中のニュートリノ検出装置内でのベータ崩壊核種の崩壊率への影響を調べた。本研究では $\beta$ 崩壊核種として $^{198}\text{Au}$ を選択し、本来Poisson分布に従う揺らぎを示すべき崩壊率に注目しその揺らぎの周期成分を求めた。その結果、放射化により生成した $^{198}\text{Au}$ がニュートリノ検出装置内部に置かれた場合には周期2時間前後の揺らぎの成分が現れた。現時点では崩壊率の揺らぎにこの周期性が現れる理由を説明することは難しいが、崩壊率に変動を与える環境(場)が存在する可能性を実験的に示すことができた。今後、他の核種及び異なる環境下での測定、崩壊の差異を明確に裏付けるための統計精度の改善や解析方法について検討する。

## 参考文献

- [1] 高レベル廃棄物の消滅処理研究開発, 日本原子力学会誌, 37巻 3号 (1995) p.3.
- [2] 山田勝美 他, ベータ崩壊と弱い相互作用, 培風館 (1974) p.10.
- [3] 日本物理学会編, ニュートリノと重力波, 裳華房 (1997) p.7.
- [4] K. Ishibashi et al., Study on Neutrino Interaction, KURRI Prog. Rep. 2000, (2001) p.47.
- [5] W. Liu et al., Attempt on Detection of Natural Neutrinos by a Simple and Compact Apparatus, Memoirs of Faculty of Engineering (Kyushu Univ.), 63 (2003) 79 - 86.
- [6] S. Ishimoto et al., Simple Calculation of Reactor Antineutrino Energy Spectrum by the Use of Nuclear Data Libraries, J. Nucl. Sci. Tech. 39 (2002) 670 - 672 ; C. Bemporad et al., Reactor-based neutrino oscillation experiments, Rev. Mod. Phys. 74 (2002) 297 - 328.
- [7] W. Liu et al., Possible Detection of Natural Neutrinos by Use of Small Apparatus, to be published in Suppl. of J. Nucl. Sci. Tech. (2004).
- [8] D.H. Whitaker, The effect of Acceleration of the Decay Rate of  $^{198}\text{Au}$ , LA-9388-MS (1982).
- [9] G.M. Viswanathan et al., Quantifying nonstationary radioactivity concentration fluctuations near Chernobyl, Phys. Rev. E 62 (2000) 4389 - 4392.
- [10] 近畿大学原子炉等利用共同研究経過報告書 (平成13年度) pp.61 - 65, 同(平成14年度).